

СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАЗОРИЕНТАЦИИ В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ И РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТЕХНИЧЕСКОГО СПЛАВА *Fe-3%Si*

Куклина А.А., Беляевских А.С.

Руководитель – профессор, д.т.н. Лобанов М.Л.

ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург
shytka_aak@mail.ru

Хорошо известно, что прокатка монокристаллов исходной ребровой ориентировки (110)[001] приводит к формированию двух симметричных октаэдрических ориентировок $\{111\}<112>$, а последующий рекристаллизационный отжиг – вновь к ребровой ориентировке. Подобные преобразования структуры показывают, что в материале реализуется механизм текстурной наследственности. Кристаллографический анализ показывает, что точная ребровая ориентировка близка к специальным разориентировкам $\Sigma 9$ и $\Sigma 27$ (кратным $\Sigma 3$) по отношению к симметричным октаэдрическим ориентировкам (отклоняется от них на угол $\pm 3,68$ градусов вокруг оси $<110>$). Последнее позволяет предположить, что механизм текстурной наследственности может быть связан со специальными разориентациями.

Исследование подобных процессов может представлять интерес для оптимизации технологии производства сверхтонкой (0,15-0,01 мм) ленты электротехнической анизотропной стали (ЭАС) по методу Литманна, использующейся для изготовления магнитопроводов высокочастотных устройств. Технология предполагает холодную прокатку полосы крупнозернистой (5-30 мм) ЭАС с совершенной ребровой текстурой толщиной $\sim 0,3$ мм и последующий отжиг на первичную рекристаллизацию (ПР), т.е. реализует механизм текстурной наследственности «ребро-октаэдр-ребро».

Роль специальных границ, соответственно, специальных разориентаций, в процессах формирования текстур при деформации и рекристаллизации до настоящего времени остается предметом активного внимания исследователей. Настоящая работа посвящена изучению процессов возникновения специальных разориентаций при формировании деформационной мезоструктуры (деформационных двойников, деформационных и переходных полос, а также полос сдвига) и их роли при образовании зародышей ПР.

Для проведения исследований использовались образцы готовой электротехнической анизотропной стали, произведенной на ООО «ВИЗ-Сталь». Образцы представляли собой пластины с удаленным

электроизоляционным покрытием размерами 0,27x30x280 мм, состоящие из крупных зерен (размер в плоскости прокатки 30...50 мм), характеризующимся достаточно совершенной текстурой $\{110\}\langle 001\rangle$. Образцы прокатывались с суммарной деформацией от 5 до 60 % в направлении близком к $\langle 001\rangle$, после чего подвергались градиентному отжигу в интервале температур 400-800°C. На различных стадиях рекристаллизации проводились исследования микроструктуры на электронном микроскопе JEOL JSM6490LV с приставкой Oxford Instruments (EBSD).

При холодной прокатке в исходно ребровых монокристаллах реализовывались все основные моды деформации. При степени деформации $\sim 5\%$ образовывались двойники, сохраняющиеся до завершения холодной прокатки. С начала процесса деформации наблюдалась плавная переориентация кристаллической решетки в локальных областях – формировались полосы деформации. При степени деформации $\sim 20\%$ в структуре фиксировались полосы сдвига, наклоненные под углом $\sim 17^\circ$ к плоскости прокатки, при больших степенях деформации появлялись полосы сдвига, наклоненные под углом $\sim 35^\circ$. Таким образом, уже при сравнительно небольшой величине деформации формировалась достаточно сложная мезоструктура, состоящая из локальных объектов, имеющих кристаллические решетки существенно разориентированные между собой. Последнее выражалось в фиксации специальных границ ориентационной микроскопией - EBSD (табл. 1).

Зародыши ПР с ребровой ориентировкой, возникающие в деформированном сплаве $Fe-3\%Si$ при отжиге, образовывались в/на всех объектах мезоструктуры: переходных полосах, полосах сдвига и деформационных двойниках. Факт появления зерен одной ориентации при ПР на разных объектах мезоструктуры позволяет предполагать существование единого механизма их образования и связывать его со специальными разориентациями (специальными границами). Вновь образованные зерна ПР находились в специальных разориентациях по отношению к объектам деформационной мезоструктуры, совпадающих с набором разориентаций сформировавшимся в процессе холодной прокатки (табл. 2).

В настоящее время интенсивно обсуждается роль специальных границ в формировании зародышей вторичной рекристаллизации, причем достоверных экспериментальных доказательств роли специальных границ в процессах аномального роста нет. Очевидно, что появлению специальных границ между кристаллитами сплава должно предшествовать образование специальных разориентаций. В настоящей работе экспериментально показана значимая роль специальных разориентаций в процессе формирования текстуры при деформации и ПР в техническом сплаве $Fe-3\%Si$.

Таблица 1. Характеристики специальных разориентаций между объектами мезоструктуры в процессе деформации

Место формирования	Разориентация	Ось [uvw]	θ°	Переходы разориентаций	
				Тип	Δ перехода, $^\circ$
Деформационная полоса (матрица) – Деформационный двойник	$\Sigma 3$	111	60,00	$\Sigma 3 \rightarrow \Sigma 17b$	15,79
				$\Sigma 3 \rightarrow \Sigma 43c$	10,02
				$\Sigma 3 \rightarrow \Sigma 33c$	35,26
	$\Sigma 17b$	221	61,93	$\Sigma 17b \rightarrow \Sigma 3$	-15,79
				$\Sigma 17b \rightarrow \Sigma 43c$	5,77
	$\Sigma 43c$	332	60,77	$\Sigma 43c \rightarrow \Sigma 3$	-10,02
				$\Sigma 43c \rightarrow \Sigma 17b$	-5,77
	$\Sigma 33c$	110	58,99	$\Sigma 33c \rightarrow \Sigma 3$	-35,26
				$\Sigma 33c \rightarrow \Sigma 17b$	-19,47
Деформационная полоса (матрица) – Деформационная полоса (матрица)	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$	12,41
				$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$	7,35
				$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 33a$	18,89
	$\Sigma 27a$	110	31,59	$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$	5,06
				$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 33a$	11,54
				$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	-7,35
	$\Sigma 19a$	110	26,53	$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$	-5,06
				$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 33a$	6,48
				$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 9$	-12,41
Деформационная полоса (матрица) – полоса сдвига	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$	12,41
				$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$	7,35
				$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 11$	-11,54
	$\Sigma 27a$	110	31,59	$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$	5,06
				$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	-7,35
	$\Sigma 19a$	110	26,53	$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$	-5,06
				$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 33a$	6,48
	$\Sigma 11$	110	50,48	$\Sigma 11 \rightarrow \Sigma 9$	-11,54

Таблица 2. Характеристики специальных разориентаций между объектами деформационной мезоструктуры и рекристаллизованными зернами с ориентировкой $\sim (110)[001]$ в начале первичной рекристаллизации

Место формирования	Разориентация	Ось [uvw]	θ°	Переходы разориентаций	
				Тип	Δ перехода, $^\circ$
Зерна, растущие от границ двойников – деформационные двойники	$\Sigma 3$	111	60,00	$\Sigma 3 \rightarrow \Sigma 17b$ $\Sigma 3 \rightarrow \Sigma 33c$	15,79 35,26
	$\Sigma 17b$	221	61,93	$\Sigma 17b \rightarrow \Sigma 3$ $\Sigma 17b \rightarrow \Sigma 43c$	-15,79 5,77
	$\Sigma 43c$	332	60,77	$\Sigma 43c \rightarrow \Sigma 17b$	-5,77
	$\Sigma 33c$	110	58,99	$\Sigma 33c \rightarrow \Sigma 3$	-35,26
Зерна, растущие от границ двойников – деформационная полоса (матрица)	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 33a$	12,41 7,35 18,89
				$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 33a$ $\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	5,06 11,54 -7,35
				$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 33a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 9$	-5,06 6,48 -12,41
	$\Sigma 19a$	110	26,53	$\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 9$	-6,48 -11,54 -18,89
	$\Sigma 33a$	110	20,05		
	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 33a$	12,41 7,35 18,89
				$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	5,06 -7,35
				$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 9$	-5,06 -12,41
	$\Sigma 33a$	110	20,05	$\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 9$	-6,48 -18,89
Зерна, растущие из переходных полос – деформационная полоса (матрица)	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 11$	12,41 7,35 -11,54
	$\Sigma 27a$	110	31,59	$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	5,06 -7,35
	$\Sigma 19a$	110	26,53	$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 33a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 9$	-5,06 6,48 -12,41
	$\Sigma 33a$	110	20,05	$\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 19a$	-6,48
	$\Sigma 17b$	221	61,93	-	-
	$\Sigma 29b$	221	46,40	-	-
Зерна, растущие из полос сдвига – деформационная полоса (матрица)	$\Sigma 9$	110	38,94	$\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 9 \rightarrow \Sigma 11$	12,41 7,35 -11,54
	$\Sigma 27a$	110	31,59	$\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 19a$ $\Sigma 27a \rightarrow \Sigma 9$	5,06 -7,35
	$\Sigma 19a$	110	26,53	$\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 27a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 33a$ $\Sigma 19a \rightarrow \Sigma 9$	-5,06 6,48 -12,41
	$\Sigma 33a$	110	20,05	$\Sigma 33a \rightarrow \Sigma 19a$	-6,48
	$\Sigma 11$	110	50,48	$\Sigma 11 \rightarrow \Sigma 9$	-11,54